躯体蓄熱システムにおける蓄熱特性の評価に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THERMAL CHARACTERISTICS OF HEATING/COOLING SYSTEM WITH BUILDING THERMAL MASS STORAGE

中村 卓司*, 長野 克則**

Takuji NAKAMURA and Katsunori NAGANO

The real-scale experimental unit of HVAC system using building thermal mass storage for a commercial building was constructed and a series of experiment was carried out. The experimental condition varies direction of blowing, flow rate and density of diffuser in order to clarify their influence to the amount of charging energy into the slab. And the thermal storage capacity was analyzed making unit by differential of initial concrete slab temperature and blowing temperature. The result shows that the unit thermal storage capacity was proper, and the unit thermal storage capacity of horizontal blowing is larger than from 1.4 times to 1.9 times as vertical blowing.

Keywords: Building thermal mass storage, characteristic of thermal storage, unit thermal storage capacity

躯体蓄熱、蓄熱特性、単位蓄熱量

1. はじめに

従来より電力負荷平準化のため水蓄熱・氷蓄熱システムが開発、利用されてきたが、近年コンクリートスラブなど躯体を蓄熱体として利用する躯体蓄熱システムが注目を集めるようになってきた。躯体蓄熱の特長として、夜間電力の利用によるランニングコストの低減、および機器容量の削減によるインシヤルコストの低減といった蓄熱システムの一般的な利点に加え、①既にある建物躯体を利用することで、高価な水・氷蓄熱の蓄熱槽・熱源機の容量を削減できる、②躯体から直接室内に放熱されるため2次側空調設備の容量を削減できる、③蓄冷された躯体により放射冷房効果を期待できるといったメリットがある半面、主蓄熱体であるスラブへの蓄熱・放熱特性が明らかでないという問題点が残されていた。

この原因として、蓄熱時のスラブへの空気の吹付けが局所的になり蓄熱に分布ができるため、その効果の把握が困難であったことが挙げられる。また、従来の性能評価は実建物での測定が多く、それらは外乱の影響を受けている。これに対し、スラブ温度を詳細に測定でき再現性の高い実大規模の試験装置が製作され基礎的な実験と性能評価が行われた。¹⁾²⁾³⁾

本論文ではさらに、蓄熱量が吹付け方法、風量、温度、天井裏の梁などに大きく影響を受けることに着目し、これらの影響因子を条件に試験を行い、条件毎の蓄熱特性を躯体蓄熱の検討に簡易に利用可能な形に整理することを目的に蓄熱量の新たな評価法の提案を行った。また、その評価法を用いて蓄熱特性に関し考察を加えた。

2. 試験装置概要¹⁾

2.1 試験室の概要

試験装置は清水建設技術研究所の倉庫内に建設した。建物用途は標準的な事務所ビルを想定し、スラブの熱特性が測定できるようにスラブを挟んだ上下2層の試験室を設置した。その1面は外気の影響を再現できるように窓ガラスのある外壁からなり、外壁の外側は温度制御のできる外気室を設けた。残りの5面は温度対象を想定し断熱材で仕切る構造とし、実建物の中間階1区画を切出した状態とした。各室の寸法は試験室部分が内寸法幅6.4m、奥行き10m、階高3.5m(上層試験室は1.5m)、外気室部分が内寸法幅6.9m、奥行き5m、階高5.0mである。試験室は一般的な事務室を想定し、床は各層共OAフロア(h=100)で、下層試験室天井は15mm厚の岩綿吸音板からなるシステム天井とした。倉庫内に面する外周部はフォームポリスチレン保温板(100mm厚の2枚重ね)で、下層試験室床下はフォームポリスチレン保温板(50mm厚)、上層試験室天井はロックウール(100mm厚)で断熱した。図1に試験室概要図を示す。

図1 試験室概要図

* 清水建設技術研究所 工修

** 北海道大学大学院工学研究科 教授・工博

Institute of Technology, Shimizu Corporation, M. Eng.

Prof., Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Dr. Eng.

2.2 空調システム概要

図2に試験装置の空調システム概要を示す。上下試験室は、空冷ヒートポンプチラーを熱源とする単一ダクト空調方式とした。給気は天井アネモディフューザー(上層試験室は壁付ディフューザー)吹出しと床吹出し空調の切替え式とした。還気は、天井チャンバー還気(下層試験室)と室内還気および床下還気の切替え式とした。これらの切替えパターンの組み合わせにより、様々な蓄・放熱試験をスケジュール運転で行うことができる。外気室は、セパレート型エアコンを設置した。

図2 空調システム概要

2.3 計測システム

測定点は風量、給気・還気温湿度、各室温湿度、流量、送水・還水温度、床スラブ・壁等の表面・内部温度等で、測定点総数は約 300 点である。床スラブは蓄放熱量を可能な限り精度よく算出するため図3に示す位置に約 150 点の T 型熱電対を設置した。特にスラブ内の温度分布の影響を把握するため図3(1)の垂直 5 点が 4 箇所、(2)の垂直 3 点が 39 箇所、(3)の垂直 2 点が 4 箇所の温度センサーを設置した。また、測定間隔は 5 分間でデータローガーを介しパソコンに取り込んだ。測定機器一覧を表1に示す。

		ブロックⅠ			ブロックⅡ			ブロックⅢ			ブロックⅣ			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
外気室	A	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1270
	B	○	○	○	小梁	○	○	○	○	○	○	○	○	1185
	C	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1205
	D	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1085
	E	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1085
	F	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1200
		712	877	977	882	815	875	792	857	840	807	832	955	10,220

図3 スラブ温度測定位置

表1 計測装置一覧

測定対象	機器名
温度	0.32φT型熱電対
表面温度	0.1φT型熱電対
風速	定置式複合ピトー管センサ、精度±0.2%以内
湿度	高分子型、精度±3%RH(30~70%、25℃) ±5%RH(20~80%、15~35℃)
流量	電磁流量計、精度±0.8%(流速0.5~0.7m/s) ±0.6%(流速0.7m/s以上)

3. 躯体蓄熱空調方式の概要と試験条件

3.1 躯体蓄熱空調方式と試験方法

蓄熱方式は複数検討されているが、本論文では切替えダンパー方式の結果について述べる。切替えダンパー方式とは天井ディフューザー手前の天井内で切替えダンパーを設けることにより夜間蓄熱時は天井裏に冷風を吹付けスラブへ蓄熱し、昼間空調時は天井ディフューザーより室内に給気し、天井チャンバー還気時にスラブから放熱を行うシステムである。切替えダンパー方式の特長としてはシステムが簡易であるが蓄熱が局所的になることが考えられる。そこで試験では、スラブへの吹付け方向、風量、吹付け口密度等を変化させ影響度の比較を行った。また、過去の実験より蓄熱には梁の影響が大きいため、梁で囲まれた空間を一単位として扱い、これを「ブロック」(約 2.5m×6.4m、約 16m²)と呼び検討することとした。図3に示すようにブロックⅠからブロックⅣに分ける。また、ブロックに吹出し口を設けられなかった場合を想定し、梁をくぐることによる蓄熱量の減少の検討を行った。その他、具体的な試験条件は次節に示す。

3.2 試験条件

3.2.1 試験条件

表2に今回設定した試験条件を示す。試験番号1(ケース記号V-1)を「標準仕様」とし、その他の条件は常に標準仕様と1項目だけ異なる条件の試験となるように設定した。表中の吹付け方式「垂直」(吹出し口：口径 D=200φ)とはスラブ下 1.5D の位置から垂直に吹付ける方式である。「水平」(吹出し口：600L×25H のスリット)の場合にはデッキプレートの波に直角方向に、「穴明きダクト」(吹出し口：口径 200φ のダクトに 300 ピッチで 50φ の穴)ではデッキプレートの波の方向に空気を吹付ける。図4から図8に各方式の吹出し口の位置を示す。吹付け風量は 2 段階設定した。床面積当たりの風量 28m³/(m²・h) (平均風速 3.2m/s) は昼間の空調時と同等の風量とし、全吹出し口の合計でおおよそ 1800CMH である。試験番号 2(V-2) 風量 14m³/(m²・h)は夜間のみこれの半分の風量とした。ブロック当たりの吹出し口個数の相違試験では、標準の吹出し口数(ブロック当たり 1.5 個)に追加、削除を行い試験番号 3(V-3)は図5に示す位置に

表2 試験条件一覧

試験番号	ケース記号	①	②	③	④	⑤
		吹付け方式	吹付け風量 [m ³ /(m ² ・h)]	ブロック当たりの 吹出し口個数 [個/ブロック]	梁くぐり回数 [回]	吹出し温度 [℃]
1	V-1	垂直	28	1.5	0	15
2	V-2	垂直	14	1.5	0	15
3	V-3	垂直	28	2	0	15
4	V-4	垂直	28	1	1or2	15
5	V-5	垂直	28	1.5	0	11
6	V-6	垂直	28	1.5	0	9
7	H-1	水平	28	1.5	0	15
8	D-1	穴明きダクト	28	—	0	15

図4 V-1 (標準)の吹出し口位置

図5 V-3の吹出し口位置

図6 V-4の吹出し口位置

図7 H-1の吹出し口位置

図8 D-1の吹出し口位置

図9 居室吹出しとレターン位置

2個の場合の吹出し口を設けた。試験番号4(V-4)は梁をくぐる回数による蓄熱量の減少を測定する試験で、図6に示す吹出し口位置とした。ブロックIII、ブロックIVには吹出し口が無い。吹出し温度は標準の15℃の他、11℃、9℃の計3種類設定した。また、蓄熱時間は全ケースで3:00から8:00までの5時間とした。試験期間は躯体の熱容量を考慮し数日実施し、安定した日のデータを用いた。また、吹出し温度など環境が大きく異なるケースでは1週間程度の試験を実施した。図9に空調時の室内吹出し口、天井吸い込み位置と天井内のレターン位置を示す。

3.2.2 外乱および空調、室内発熱条件

外気室は常時30℃一定制御とし、日射発熱は図10に示すスケジュールで白熱球による模擬発熱を下層試験室窓内側に加えた。空調は上層、下層試験室とも空調時間(8時～20時)は室温26℃設定、蓄熱時は天井裏吹出し温度一定制御とし、試験条件により吹出し温度を変更した。室発熱は事務所を想定し、図10に示す室内模擬発熱を蛍光灯、および白熱電球により加えた。

図10 内部発熱スケジュール

4. 試験結果、および考察

4.1 試験結果の再現性の評価

試験装置の再現性に関しては筆者らのグループで報告^{2),3)}されている。ただし、蓄熱の評価には放熱を含めた一日を通しての試験の再現性を確認しておく必要があるため、本試験におけるスラブ温度の日変化の評価を行った。スラブ温度は蓄熱の局所性を考慮するため、以下の方法により平均温度を算出した。まず、仮想的にスラブ内部をメッシュ分割し、温度測定メッシュは測定値を測定していな

いメッシュは近傍メッシュの測定値より補完してメッシュ温度を求め、これをメッシュの代表温度とした。メッシュ分割は図3に示すように水平面では間口方向は6分割、奥行き方向は12分割し、一つのメッシュの受け持つ面積が1m四方以下となるようにした。垂直方向は上層、中層、下層に3分割した。今回使用したデッキプレートは凹凸があるため凹凸各部を3分割し加重平均して厚さを設定した。加重平均厚さは上層46mm、中層40mm、下層40mmとなり、温度センサーは上から20mm、80mm、140mmの位置に設置した。この結果、メッシュ総数は216点となっている。

図11はスラブの平均温度の蓄熱開始時(3:00)からの経時変化であり、蓄熱開始時の平均温度を基準とする無次元温度で表している。

$$T_c^*(t) = \frac{T_c(t) - T_{c0}}{T_{c0}} \quad (1)$$

t : 蓄熱開始からの経過時間 [h]

T_c^* : 無次元スラブ平均温度 [-]

T_{c0} : 蓄熱開始時のスラブ平均温度 [℃]

T_c : t 時間後のスラブ平均温度 [℃]

これによると蓄熱開始時(3:00)と放熱終了時(翌日の3:00)の無次元温度差は±0.002以内で準周期定常になっており、蓄熱の比較評価は十分可能であるといえる。

図11 スラブ平均温度の経時変化

4.2 スラブの平均温度、並びに蓄熱量の経時変化

図12から図19に各ケースのスラブの平均温度、並びにスラブ全

図 12 スラブ平均温度、蓄熱量、及び給気温度の経時変化 (V-1 (標準))

図 16 スラブ平均温度、蓄熱量、及び給気温度の経時変化 (V-5)

図 13 スラブ平均温度、蓄熱量、及び給気温度の経時変化 (V-2)

図 17 スラブ平均温度、蓄熱量、及び給気温度の経時変化 (V-6)

図 14 スラブ平均温度、蓄熱量、及び給気温度の経時変化 (V-3)

図 18 スラブ平均温度、蓄熱量、及び給気温度の経時変化 (H-1)

図 15 スラブ平均温度、蓄熱量、及び給気温度の経時変化 (V-4)

図 19 スラブ平均温度、蓄熱量、及び給気温度の経時変化 (D-1)

体の蓄熱量の経時変化を示す。スラブへの蓄熱量はスラブの温度変化より求めた。蓄熱量は前節で定めた各メッシュの温度変化に加重平均したメッシュ体積熱容量を乗じて算出した。図中の蓄熱量は毎正時から1時間後の温度差より求め、温度は毎正時から1時間の平均値とした。

図12はV-1の結果であるが、蓄熱時間5時間でのスラブの平均温度低下は1.3℃であり、スラブ全体で平均した温度低下は小さい。また、1時間当たりの蓄熱量は最初の1時間は409kJであるが時間経過に従う減衰率が大きく、5時間後には132kJに低下している。この傾向は試験条件により大きく異なり、例えばV-5では最初の1時間の蓄熱量は589kJでV-1の1.4倍、V-6では最初の1時間の蓄熱量は627kJで約1.5倍である。このように蓄熱量は吹出し温度が低いと大きい。また、水平吹き付けのH-1では時間経過に従う蓄熱量減衰率が小さく5時間の合計ではV-1の1.2倍である。さらに穴明きダクトのD-1では初期の蓄熱量も大きく、蓄熱量の減衰率も小さくなっている。しかしながら、このままでは各ケースの比較が難いため次章でもう少し詳しい検討を行う。

5. 単位蓄熱量による評価法の検討

5.1 温度差基準の単位蓄熱量

通常、設計時には細かい条件設定を行うことは不可能である。そこで本論文ではまず、スラブ全体を平均して扱うこととした。これにより、今回設定するような条件では一括して本論文の結果を用いることが出来る。ただし、今回の試験装置の加重平均スラブ厚は126mmであるので、それより大きく異なる場合は適用できない。

次に初期スラブ温度と吹出し温度を利用して、蓄熱量を両者の温度差で除した単位温度差あたりの単位蓄熱量を評価法とすることとした。式(2)はスラブ単位面積あたり、蓄熱開始時のスラブ平均温度と吹付け温度の温度差あたりの単位蓄熱量を表す。

$$\alpha(t) = \frac{Gt(t)}{S \times (T_{c0} - T_a)} \times 3.6 \quad (2)$$

t : 蓄熱開始からの経過時間 [h]
 α : t 時間後の単位蓄熱量 [W/(m²・K)]
 Gt : t 時間後の蓄熱量 [kJ/h]
 S : スラブ面積 [m²]
 T_{c0} : 蓄熱開始時のスラブ平均温度 [℃]
 T_a : 吹付け温度 [℃]

この指標であれば実際の設計時でも簡易に利用できる実験データとなり得ると考える。図20は単位蓄熱量の経時変化を算出し回帰式を導いた結果である。回帰式は式(3)で表される。試験ケース別の各種定数、並びに相関係数を表3に示す。

$$\alpha = a \times e^{-bt} \quad (3)$$

t : 蓄熱開始からの経過時間 [h]
 α : t 時間後の単位蓄熱量 [W/(m²・K)]
 a, b : 実験定数 [-]

解析にあたって吹出し温度は蓄熱時間帯中はほぼ一定であったので蓄熱時間での平均値を用いた。これは、実際の建物の検討では吹出し温度の設定値を用いることができる。また、図20中V-4(0)はV-4での吹出し口の無いブロックIVの蓄熱量である。このブロックは吹出し口のある最も近いブロックから大梁と小梁を越えた天井内レターンのあるブロックである。

図20 単位蓄熱量の経時変化の比較

表3 回帰式の定数、並びに相関係数

試験ケース	a	b	R ²
V-1	4.027	-0.257	0.956
V-2	3.430	-0.189	0.945
V-3	4.727	-0.179	0.991
V-4	3.882	-0.180	0.970
V-5	4.564	-0.325	0.913
V-6	4.398	-0.299	0.911
H-1	3.326	-0.061	0.882
D-1	5.015	-0.101	0.967
V-4(0)	1.387	-0.050	0.959

5.2 単位蓄熱量による評価法の検証

初期スラブ温度と吹出し温度の温度差で除した単位蓄熱量の妥当性を確認するため、吹出し温度条件のみ異なるV-1 (15℃吹出し)、V-5 (11℃吹出し)、V-6 (9℃吹出し) の3ケースの比較を行った。図21は実測値より式(2)を用いて5時間の蓄熱量変化とその合計値を示したものである。3者は同様の変化を示し、合計値での差は最も多いV-1と最も少ないV-5で4%であった。このことから、今回のデータ解析法は妥当であり、蓄熱量は初期スラブ温度と吹出し温度の差に比例すると言える。

5.3 単位蓄熱量を用いた評価法による蓄熱条件の影響の検討

5.3.1 吹付け風量による影響

まず吹付け風量による影響をみるため式(3)を用いてV-1 (28m³/(m²・h))とV-2 (14m³/(m²・h))の比較を行った。図22がその結果である。風量の多いV-1は初期の蓄熱量が若干多いものの時間経過に従い蓄熱量の減少率が大きく5時間経過時点では蓄熱量の合計がほぼ等しくなっている。このことより今回の吹付け風量範囲では風量が蓄熱量に大きな影響を与えることは無いことがわかった。

5.3.2 吹出し口密度の影響

次にブロック当たりの吹出し口密度による影響を確認するためブロック当たり吹出し口が2個のV-3、1.5個のV-1(標準)、吹出し口の無いV-4(0)の比較を行った。図23がその結果である。V-3とV-1(標準)は全吹出し口の合計の風量は同じであるが、吹出し口が多く、風量が分散されているほど蓄熱量が増加している。また、V-4(0)より吹出し口が無く天井裏を気流が通過するだけではほとんど蓄熱が望めないのがわかる。これらのことより、蓄熱量の増加のためには均一に多くの吹出し口を設けることが必要と言える。また、V-3はV-1(標準)に比べ5時間の蓄熱量で44%多い。

5.3.3 吹付け方式による影響

最後に吹付け方の違いによる比較を行う。図24によると垂直吹付けのV-1(標準)と水平吹付けのH-1では蓄熱開始直後ではほぼ同程度の蓄熱量であるがH-1は蓄熱量の減衰率が低く、蓄熱5時間の合計ではV-1(標準)の1.4倍となっている。これは、水平吹付けの方がスラブに均一に気流があたりスラブ全面に蓄熱されるためと考えられる。また、同じ水平吹付けでもデッキプレートに溝に沿って空気を吹付けるD-1は蓄熱初期から蓄熱終了まで絶えず蓄熱が多くV-1(標準)の1.9倍である。これは、スラブ初期温度と吹出し温度の温度差に換算するとそれぞれ、1.4℃と1.9℃に相当する。また、同じ水平吹付けでもデッキプレートの波の方向が気流性状と蓄熱特性に大きく影響していることがわかった。

図21 吹出し温度の違いの比較

図22 吹付け風量の違いの比較

図23 ブロック当たりの吹出し口密度の違いの比較

図24 吹付け方式の違いの比較

6. まとめ

本論文では躯体蓄熱システムに関し、再現性のある試験装置にて蓄熱条件を変えて試験を実施した。また、その結果を用いて簡易に蓄熱量を推定できる評価手法を検討し、それを用いて蓄熱影響因子別の実験式を提示し、得られた成果を汎用的に利用できる形にまとめた。以下に本論文で得られた知見をまとめる。

- 1) 蓄熱量の評価法として初期スラブ温度と吹出し温度の温度差で除した単位蓄熱量の実験式で表わす評価法を提案した。また、実験結果より蓄熱量がこの温度差に比例していることを確認し、この評価法が適正であることを検証した。
- 2) 天井裏に供給する風量が同じでもブロック当たりの吹出し口密度が多いと蓄熱量が多くなり、逆に吹出し口の全く無いブロックでは蓄熱がほとんど見込めないことがわかった。今回の条件ではブロック当たりの吹出し口が2個の場合、1.5個の場合比較して蓄熱量が44%多くなった。
- 3) 吹付け方式による影響は大きく、今回標準とした垂直吹付けに比べて水平吹付けでは1.4倍、デッキプレートに波に沿って気流を吹付ける方式ではさらに多く1.9倍の蓄熱量が得られることがわかった。

最後に実験から得られた知見より、効率的な蓄熱条件をまとめる。

- 1) まず、吹付け方式ではスラブに水平に吹付ける方式が効率が高く、特にデッキプレートに波に沿って吹付けると蓄熱量が増加する。
- 2) 次に吹付け風量に関しては、今回の床面積当たりの風量14～

28m³/(m²・h)の範囲では蓄熱量に大きな差が見られなかった。そのため、送風エネルギーの点からは夜間の風量を半分程度にする検討が必要である。

- 3) 吹出し口の密度に関してはブロック(梁で囲まれた天井裏面積、今回は約16m²)当たり最低1個の吹出し口が必要である。
- 4) 吹出し温度に関しては当然のことながら蓄熱量と吹出し温度とスラブの温度差は比例関係となる結果が得られた。そのため蓄熱量の増減をさせるには、この温度差で調整が可能である。

参考文献

- 1)小久保吉章、川島実、福村貴司、那須原和良：躯体蓄熱を利用した空調システムの開発(その1：試験装置概要)、日本建築学会大会学術講演梗概集（環境工学Ⅱ）、pp.1009-1010、1999.9
- 2)川島実、中村卓司、野部達夫、大崎裕史：躯体蓄熱を利用した空調システムの開発(その4：試験条件と室温スラブ温度挙動)、日本建築学会大会学術講演梗概集（環境工学Ⅱ）、pp.1017-1018、2000.9
- 3)中村卓司、竹林芳久、福村貴司、小久保吉章：躯体蓄熱を利用した空調システムの開発(その5：試験結果の解析)、日本建築学会大会学術講演梗概集（環境工学Ⅱ）、pp.1019-1020、2000.9

(2007年9月10日原稿受理、2008年1月23日採用決定)